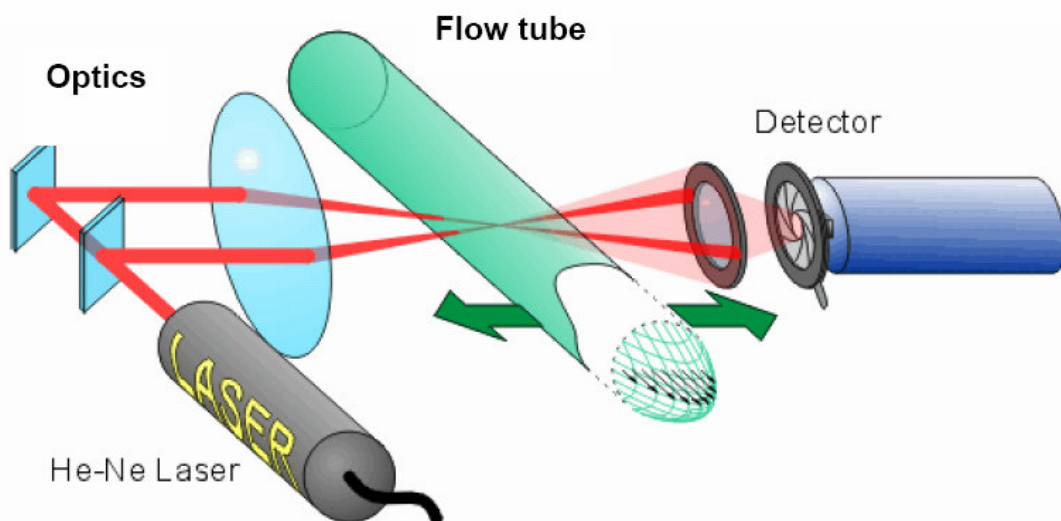


Bloedvatvernaauwing

*Het meten van stroomsnelheden met
behulp van Laser-Doppler-Anemometrie*

Praktische opdracht natuurkunde
bovenbouw VWO

i.c.m. LDA webexperiment aan de VU



vrije Universiteit amsterdam

Dit boekje is tot stand gekomen in het kader van een educatieproject als onderdeel van de masteropleiding natuurkunde aan de VU, juni 2008.

Auteur: Guus Harms

Begeleiding: Gerrit Kuik

Technische ondersteuning: Jan Mulder

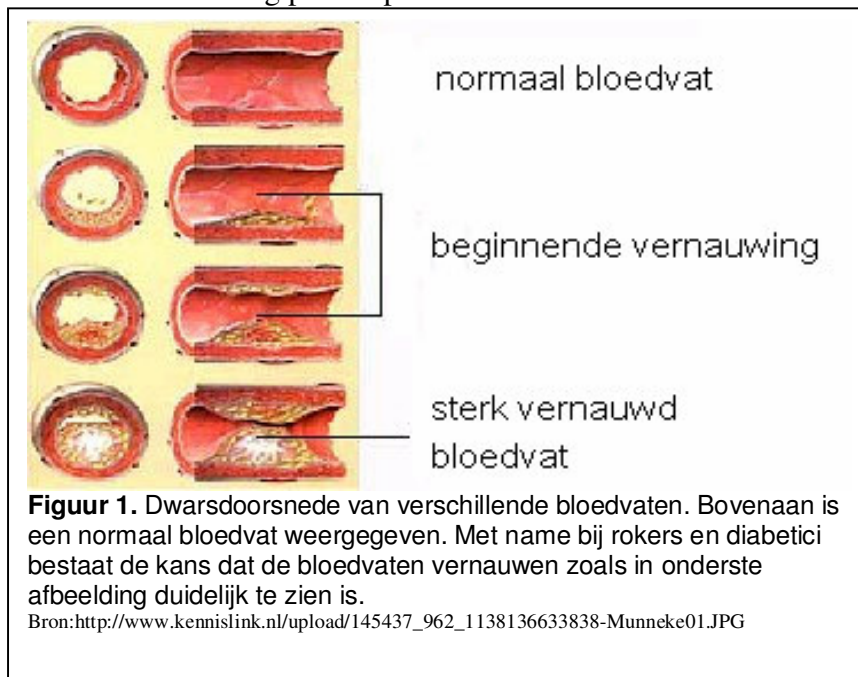
Contactpersoon: Gerrit Kuik: g.kuik@few.vu.nl

Inleiding

Op dit moment zijn hart- en vaatziekten doodsoorzaak nummer twee (na kanker) in Nederland. Een veel voorkomende hart- en vaatziekte is bloedvatvernauwing: in een dergelijk geval zijn de slagaders smaller geworden doordat er eigenlijk een extra laagje op zit (zie figuur 1). Dit komt vooral voor bij mensen die roken en die last hebben van suikerziekte. Ook verzadigde vetzuren en cholesterol kunnen bloedvatvernauwing veroorzaken.

Een typische klacht bij bloedvatvernauwing is etalagebenen, waarbij een patiënt niet lange tijd achter elkaar kan lopen omdat de benen onvoldoende zuurstof krijgen. Uiteindelijk kan de bloedvatvernauwing zelfs tot gevolg hebben dat ook het hart een extra inspanning moet leveren om toch voldoende zuurstof in alle lichaamsdelen te pompen. Dit bevordert weer slijtage van het hart en dus het risico op een hartinfarct. Een ander mogelijk gevolg is dat doordat de bloedvaten nauwer worden er meer druk op de bloedvaten komt te staan: hierdoor kan zelfs uiteindelijk een bloedvat knappen, wat een inwendige bloeding veroorzaakt: een bekend voorbeeld is een gescheurde aorta dat vaak dodelijk is.

Bloedvatvernauwing kan redelijk goed behandeld worden, meestal door bloedverdunnende middelen bij de patiënt in te spuiten. Echter voordat de behandeling plaats kan vinden dient eerst gemeten te worden wat precies de bloeddruk is en op welke plaatsen de bloedvatvernauwing precies plaatsvindt.



In deze praktische opdracht ga je een methode gebruiken die ook gebruikt kan worden om de stroomsnelheid in bloedvaten te meten. Belangrijk voordeel van deze methode is dat die ook buiten de patiënt gebruikt kan worden (er hoeft dus niet in de patiënt geprikt of gesneden te worden). Met die opstelling ga je de gevolgen van bloedvatvernauwing bepalen en bepalen in hoeverre bloedverdunners dit euvel kunnen verhelpen. Om dit

meetsysteem te begrijpen is het nodig om een drietal fysische verschijnselen te begrijpen: het dopplereffect, interferentie en een beetje vloeistofdynamica.

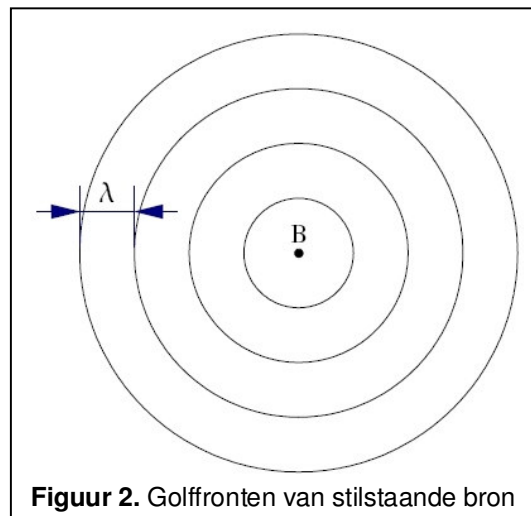
Dopplereffect

Eén van de meest gebruikte methoden om bloedsnelheid te meten is gebaseerd op het dopplereffect. Het ongetwijfeld meest bekende voorbeeld van het dopplereffect is de politiesirene waarbij je een hoge toon hoort als die naar je toe komt en een lage(re) toon als die van je af rijdt.

Opdracht 1:

Bekijk op de volgende website http://www.walter-fendt.de/ph14nl/dopplereff_nl.htm de applet over het dopplereffect en leg in je eigen woorden uit wat er gebeurt. Op de website spreekt men van een golffront. Dat kun je beschouwen als het maximum van de golf.

In je boek staat de dopplerformule aangegeven. Om het dopplereffect in detail te begrijpen zal nu eerst de afleiding voor het dopplereffect worden gegeven. We beginnen met een stilstaande geluidsbron. De geluidsbron zendt geluidsgolven uit met een bepaalde golflengte. In figuur 2 staan de golffronten weergegeven:



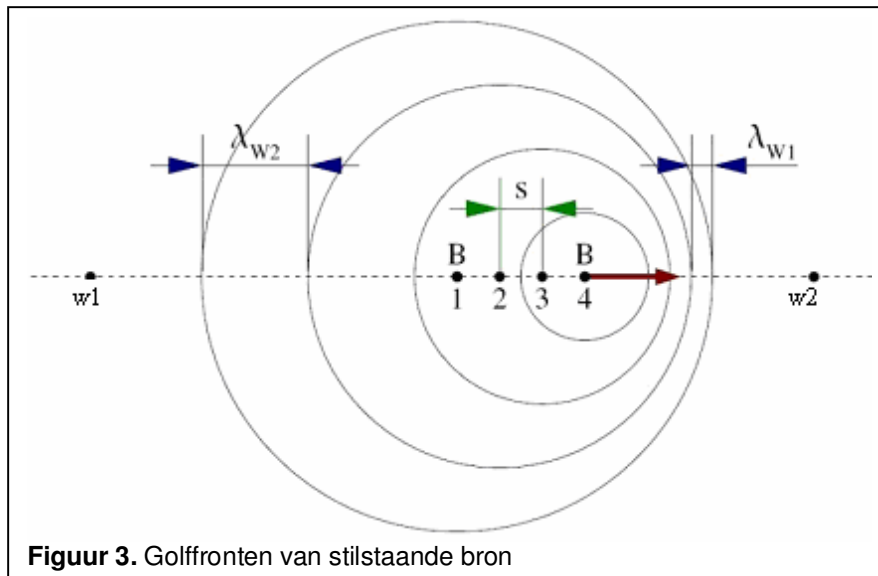
Figuur 2. Golffronten van stilstaande bron

Uiteraard geldt hier de vergelijking:

$$\lambda = \frac{v}{f} = v \cdot T, \quad (1)$$

waarbij λ de golflengte is (in m), v de geluidssnelheid (in m/s) en f de frequentie van de bron (in Hz) en T de periode van de golf, gelijk aan de trillingstijd van de geluidsbron (in s).

Nu gaat de bron bewegen en ontstaat er een situatie weergegeven in figuur 3.



Figuur 3. Golffronten van stilstaande bron

De bron is dus bewogen in de tijd dat de golven uitgezonden worden. De waargenomen golflengte rechts van de bron in figuur 3 wordt dus bepaald door de golflengte van de bron en de afstand die de bron in de tussentijd heeft afgelegd:

$$\lambda_w = \lambda_b - s_b = v \cdot T - v_b \cdot T = (v - v_b) \cdot T, \quad (2)$$

waarbij λ_w de waargenomen golflengte is, λ_b de golflengte van de geluidsgolven die de bron uitzendt, s_b de afstand die de bron binnen één trillingstijd van de golf aflegt, v de geluidssnelheid, v_b de snelheid van de bron en T de periode van de geluidsgolf (gelijk aan de trillingstijd van de geluidsbron).

De periode wordt natuurlijk gegeven door:

$$T = \frac{1}{f_b}. \quad (3)$$

λ_w wordt gegeven door:

$$\lambda_w = \frac{v}{f_w}. \quad (4)$$

Combineren van deze laatste drie uitdrukkingen geeft:

$$\frac{v}{f_w} = \lambda_w = (v - v_b) \cdot T = \frac{(v - v_b)}{f_b}. \quad (5)$$

Hieruit volgt:

$$f_w = \left(\frac{v}{v - v_b} \right) \cdot f_b. \quad (6)$$

De laatste vergelijking is de bekende dopplerformule zoals die ook in je natuurkundeboek staat. We beschouwen v_b in deze formule positief wanneer de bron de waarnemer nadert en negatief als de bron zich van de waarnemer verwijdt

Voorbeeld:

Een politieauto rijdt 120 km/h met een sirene die geluid produceert met een frequentie van 500 Hz. Een waarnemer ziet de auto op zich af komen. Welke frequentie neemt hij waar?

Antwoord:

Vul de dopplerformule in:

$$f_w = \left(\frac{v}{v - v_b} \right) \cdot f_b = \left(\frac{343 \frac{m}{s}}{343 \frac{m}{s} - \frac{120}{3,6} \frac{m}{s}} \right) \times 500 \text{ Hz} = \left(\frac{343 \frac{m}{s}}{309,67 \frac{m}{s}} \right) \times 500 \text{ Hz} = 456 \text{ Hz}$$

De auto passeert de waarnemer en rijdt nu van de waarnemer af. Welke frequentie neemt de waarnemer nu waar?

Antwoord:

Vul de dopplerformule in:

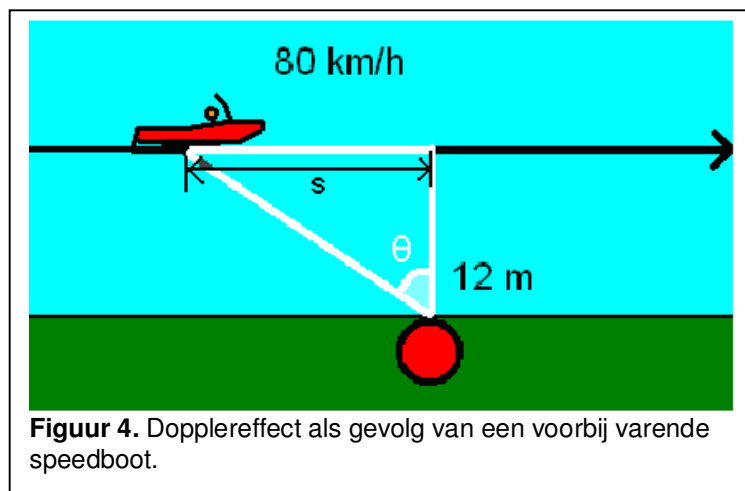
$$f_w = \left(\frac{v}{v - v_b} \right) \cdot f_b = \left(\frac{343 \frac{m}{s}}{343 \frac{m}{s} - \frac{-120}{3,6} \frac{m}{s}} \right) \times 500 \text{ Hz} = \left(\frac{343 \frac{m}{s}}{376,33 \frac{m}{s}} \right) \times 500 \text{ Hz} = 554 \text{ Hz}$$

Opdracht 2:

We hebben een ambulance die met 72 km/h met sirene aan rijdt. De sirene heeft een frequentie van 600 Hz. Bereken de frequentie van het geluid van zowel een waarnemer die zich vóór de ambulance bevindt als voor een waarnemer die zich achter de ambulance bevindt.

Opdracht 3:

Stel je nu de volgende situatie voor: je zit langs de oever van een meer en er komt een speedboot langs. De speedboot beweegt langs een rechte lijn en maakt geluid met een frequentie van 900 Hz. Het dichtstbijzijnde punt waar de speedboot komt is 12,0 meter van je vandaan (zie figuur 4). De boot vaart met 80,0 km/h.



Figuur 4. Dopplereffect als gevolg van een voorbij varende speedboot.

- a Leg uit dat je in deze situatie niet zomaar de dopplerformule kan gebruiken.

We kunnen allereerst kijken naar drie situaties waar we wel de nu waargenomen frequentie kunnen berekenen: wanneer de boot heel ver naar links is, wanneer de boot heel ver naar rechts is en wanneer de boot recht voor je is.

b Leg uit dat je in het geval dat de boot heel ver naar links is wel de dopplerformule kunt gebruiken.

c Bereken de waargenomen frequentie voor een boot die heel ver links van de waarnemer zit. Doe hetzelfde voor wanneer de boot heel ver rechts van de waarnemer is.

d Leg uit dat als de boot in het punt dat het dichtst bij de waarnemer is (dus op precies 12,0 m afstand) je een frequentie van 900 Hz hoort.

e Leg uit dat je de waargenomen frequentie van de boot kunt vinden door de snelheid van de boot in de richting van de waarnemer kunt ontbinden. En laat zien dat nu de volgende vergelijking geldt:

$$f_w = \left(\frac{v}{v \pm v_b \sin \theta} \right) \cdot f_b, \quad (7)$$

waarbij het een + is als de bron zich links van de waarnemer bevindt en een – is als de bron zich rechts van de waarnemer bevindt.

f In het figuur is s de “x-component” van de afstand tussen de speedboot en de waarnemer. Vul onderstaande tabel in:

s	f_w
100 m links	
50,0 m links	
10,0 m links	
5,00 m links	
1,00 m links	
0,00	
2,00 m rechts	
10,0 m rechts	
50,0 m rechts	
100 m rechts	
250 m rechts	

g Maak een grafiek van je waarnemingen en trek er een vloeiende lijn door. Voeg de grafiek aan dit verslag toe.

Het dopplereffect treedt ook op wanneer de waarnemer beweegt en de geluidsbron stil staat (bijvoorbeeld een waarnemer in een auto die onderweg een toeter passeert). We kunnen nu de dopplerformule voor deze situatie bepalen door het volgende voor te stellen. We beelden ons nu even als waarnemer in die beweegt. Als die waarnemer uit het raampje van zijn auto kijkt, ziet hij de rest van de wereld bewegen en vindt hij zichzelf

stil staan. In dat geval hebben we dus eigenlijk weer dezelfde situatie als bij het normale dopplereffect. Echter is het natuurlijk zo dat voor “de rest van de wereld” de waarnemer juist beweegt en de toeter stil staat. We kunnen de dopplerformule voor de bewegende waarnemer nu eenvoudig vinden door in de dopplerformule simpelweg f_b en f_w met elkaar te verwisselen. Dit levert het volgende resultaat op:

$$f_w = \frac{v - v_w}{v} f_b. \quad (8)$$

Waarbij de snelheid van de waarnemer natuurlijk weer negatief genomen moet worden op het moment dat de waarnemer zich van de bron af beweegt.

Opdracht 4:

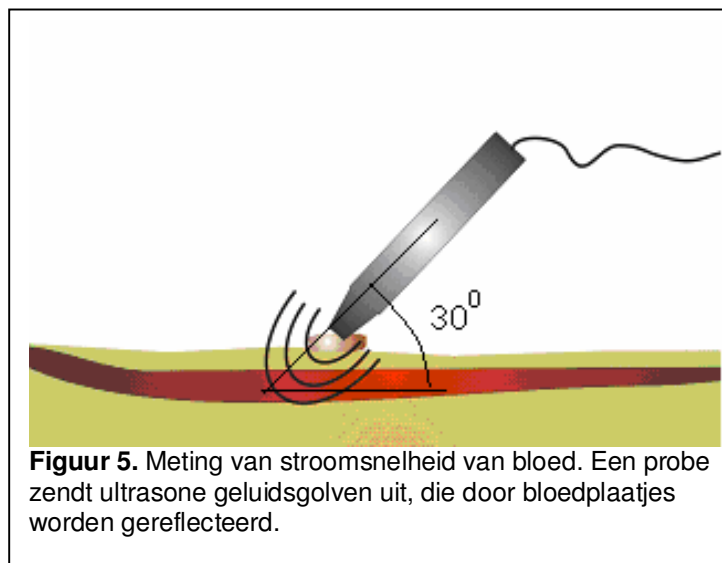
Laat zien dat je door f_w en f_b in de dopplerformule te verwisselen de dopplerformule je de dopplerformule voor de bewegende waarnemer krijgt.

Opdracht 5:

Op een zondagmiddag rijd je onder de Amsterdam ArenA door met een snelheid van 60 km/h. Net op dat moment maakt Ajax een doelpunt en gillen de supporters het uit met een frequentie van 300 Hz. Bereken de frequentie van het geluid die je in de auto waarneemt.

Je hebt nu gerekend met een aantal voorbeelden van het dopplereffect in het dagelijks leven. We gaan nu kijken naar een medisch voorbeeld waarbij het dopplereffect gebruikt wordt om de snelheid van bloed te meten. Deze methode (een combinatie van het dopplereffect en echoscopie) wordt in ziekenhuizen regelmatig gebruikt voor diagnostisch onderzoek.

In deze situatie gebeurt het volgende: een ultrasone geluidsgolf ($f = 2,2$ MHz) wordt naar het bloedvat toe uitgezonden en vervolgens weerkaatst. Dat wil zeggen dat de bloedlichaampjes eerst de geluidsgolf ontvangen en het vervolgens weer uitzenden (zie figuur 5).



Eerst gaan we kijken naar de frequentie van de ultrasone geluidsgolven van 2,2 MHz zoals waargenomen door de bloedlichaampjes. Neem daarbij aan dat de hoek tussen de probe en de bloedssnelheid gelijk is aan 30 graden en dat de geluidssnelheid in bloed gelijk is aan 1560 m/s. Ook nemen we aan dat de stroomsnelheid van bloed gelijk is aan 0,10 m/s.

Opdracht 6:

a Laat zien dat als je hier de dopplerformule direct zou invullen de gevonden waarde voor f_w niet significant verschilt van f_b .

Daarom is het verstandiger om te werken met frequentieverschillen. Als de snelheid van het geluid veel groter is dan de snelheid van de bron kunnen we de dopplerformule benaderen met (de volledige afleiding volgt na deze opgave):

$$\Delta f = \frac{v_b}{v} f_b. \quad (9)$$

Deze vergelijking geldt zowel voor het normale dopplereffect als voor de situatie van de bewegende waarnemer.

Bij een meting van de bloedsnelheid treedt eigenlijk twee keer het dopplereffect op.

b Leg dit uit.

Het zal je dus niet verbazen dat er nog een factor 2 aan de vergelijking 9 toegevoegd wordt. Een tweede effect is dat de meting van de bloedsnelheid onder een bepaalde hoek plaatsvindt.

c Leg uit dat de probe het volgende frequentieverschil zal waarnemen:

$$\Delta f = 2 \frac{v_{\text{bloed}}}{v} \cos \theta \cdot f_b. \quad (10)$$

In de opgave tot nu toe zijn we er vanuit gegaan dat we de bloedsnelheid al wisten en dat we het bijbehorende frequentiesignaal wilden bepalen. Voor de meeste bloedmetingen willen we nou juist de bloedsnelheid meten.

d We gebruiken een geluidsbron met een frequentie van 1,8 MHz. De geluidssnelheid in bloed is 1560 m/s en de probe wordt onder een hoek van 20 graden aangebracht. Het gemeten frequentieverschil is 150 Hz. Bereken de stroomsnelheid van het bloed.

Voor de volledigheid volgt hier nog de afleiding van vergelijking 9. De afleiding is lastig, het is dus niet erg als je niet alle stappen helemaal begrijpt, maar het is zeker raadzaam te begrijpen wat er gebeurt.

We hebben de dopplerformule:

$$f_w = \left(\frac{v}{v - v_b} \right) \cdot f_b. \quad (11)$$

Als we de teller en noemer in de breuk rechts van het = teken door v delen krijgen we:

$$f_w = \left(\frac{\frac{v}{v}}{\frac{v - v_b}{v}} \right) \cdot f_b = \left(\frac{1}{1 - \frac{v_b}{v}} \right) \cdot f_b. \quad (12)$$

Nu kunnen we een benaderingsformule gebruiken. Er geldt dat $\frac{1}{1 - \frac{v_b}{v}}$ ongeveer gelijk is

aan $1 + \frac{v_b}{v}$ wanneer $v_b \ll v$. Als we dit toepassen vinden we:

$$f_w = \left(1 + \frac{v_b}{v} \right) \cdot f_b. \quad (13)$$

Nu kunnen we deze vergelijking omschrijven tot:

$$f_w = \left(1 + \frac{v_b}{v} \right) \cdot f_b = f_b + \frac{v_b}{v} \cdot f_b. \quad (14)$$

Door de eerste f_b naar de linkerkant te halen krijgen we:

$$f_w - f_b = \frac{v_b}{v} \cdot f_b. \quad (15)$$

Door vervolgens te delen door f_b en $f_w - f_b = \Delta f$ te substitueren vinden we:

$$\frac{\Delta f}{f_b} = \frac{v_b}{v}, \quad (16)$$

waarmee we de vergelijking 9 hebben gevonden.

Opdracht 7:

In de vorige afleiding heb je aangenomen dat geldt $\frac{1}{1 - \frac{v_b}{v}} \approx 1 + \frac{v_b}{v}$ wanneer $v_b \ll v$.

a Leg uit dat $v_b \ll v$ betekent dat $\frac{v_b}{v} \ll 1$.

We gaan de benaderingsformule die we in de vorige afleiding hebben gebruikt nu controleren. We zeiden toen dat als $v_b \ll v$ er geldt dat:

$$\frac{1}{1 - \frac{v_b}{v}} \approx 1 + \frac{v_b}{v}.$$

We noemen de breuk $\frac{v_b}{v}$ nu x en krijgen dus de twee formules $\left(\frac{1}{1 - x} \right)$ en $1 + x$.

b vul daarvoor onderstaande tabel in:

x	$\left(\frac{1}{1-x}\right)$	$1+x$
0		
0,001		
0,01		
0,1		
1		

c Plot $f(x) = \left(\frac{1}{1-x}\right)$ en $g(x) = 1+x$ op je grafische rekenmachine in het domein $[0,1]$. Maak een schatting tot welke waarde van x de benaderingsformule ongeveer geldig is. Leg je antwoord uit.

d Wat betekent antwoord c voor de doppler snelheidsmeting van bloed? Is de fout die er gemaakt wordt door de benaderingsformule te gebruiken groot?

Interferentie

Voor de metingen die je dadelijk zal gaan doen maak je gebruik van twee laserbundels. Daarmee maak je een interferentiepatroon. Interferentie werd voor het eerst ontdekt door de Britse wis- en natuurkundige Thomas Young in 1803. Hij ontdekte dat wanneer een monochromatische bundel op twee spleten schijnt er op een scherm achter de twee spleten afwisselend donkere en lichte plekken ontstaan. Dit noemen we een interferentiepatroon.

Interferentie valt te verklaren door te kijken naar het golfkarakter van licht. Indien men een lichtbundel op een dubbele spleet laat schijnen ontstaan er twee golffronten op de plek waar de dubbele spleet is. Omdat de golven beiden dezelfde golflengte en intensiteit hebben zullen ze samen afwisselend elkaar versterken of elkaar uitdoven. Ze versterken elkaar als beide golven *in fase* zijn en doven elkaar uit als ze *uit fase* zijn.

In de volgende applet is interferentie weergegeven:

<http://vsg.quasihome.com/interfer.htm>.

Opdracht 8:

Bekijk de java-applet en geef aan wat er gebeurt als:

- je de afstand tussen de spleten varieert
- je de golflengte van het licht varieert
- je de afstand tot het scherm varieert

De afstand tussen de verschillende maxima op het scherm wordt gegeven door:

$$\Delta y = \frac{L}{d} \lambda, \quad (17)$$

waarbij Δy de afstand tussen twee maxima is, L de afstand van de spleten tot het scherm, d de afstand tussen twee spleten is en λ de golflengte van het licht.

Opdracht 9:

Vergelijk wat je hebt waargenomen met het java-applet met wat je verwacht op grond van vergelijking 17. Komt het met elkaar overeen?

Opdracht 10:

We schijnen een laserbundel met een golflengte van 532 nm op twee spleten met een onderlinge afstand van $2,0 \mu\text{m}$. Achter de dubbele spleet wordt op een afstand van 1,0 m een scherm geplaatst. Bereken de afstand tussen twee maxima van het interferentiepatroon.

Opdracht 11:

In plaats van een dubbele spleet nemen we een tweetal spiegels. De eerste spiegel is half doorlaatbaar, de tweede reflecteert al het licht. Beide spiegels staan onder een hoek van 45 graden ten opzichte van de lichtbundel (zie figuur 7) en op een onderlinge afstand van 1,0 cm van elkaar. Nadat de laserbundels weerkaatst zijn door de spiegels lopen ze parallel aan elkaar.

- a Leg uit dat ondanks dat er twee laserbundels parallel aan elkaar zijn er (nog) geen interferentiepatroon waarneembaar zal zijn (tip: zijn de gespiegelde laserbundels bolgolven? Kunnen de lichtgolven van de twee lasers elkaar overlappen zodat interferentie zal ontstaan?)

Er wordt nu een klein beetje aan de spiegels gedraaid zodat op een afstand van 1,0 m van de spiegels de laserbundels samenvallen.

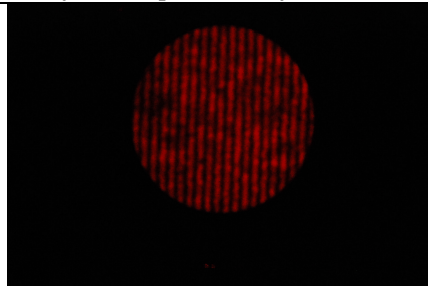
- b Leg uit dat er nu wel een interferentiepatroon zal ontstaan op de plaats waar beide laserbundels samenvallen. Betrek ook figuur 6 bij je antwoord (tip: als je een beetje scheel kijkt dan valt het interferentiepatroon nog beter te zien).



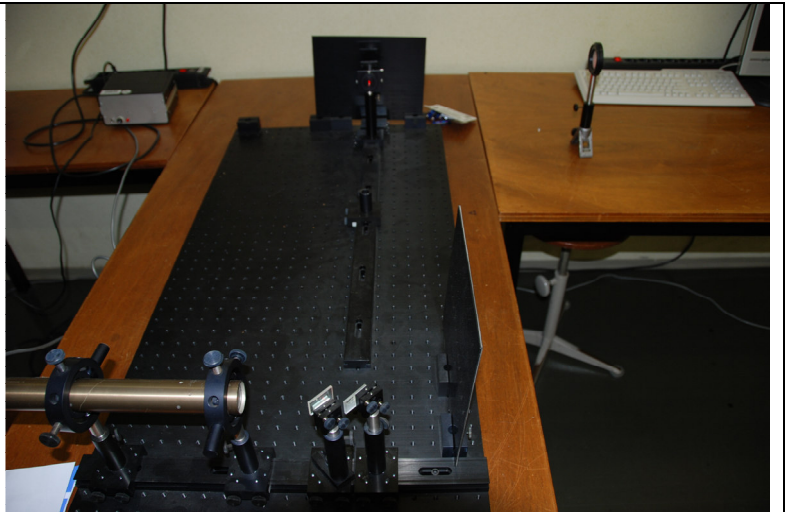
- c Vraag nu je docent om de twee transparanten die bij deze praktische opdracht horen. We beschouwen de zwarte en witte lijnen als afwisselend een golfmaximum en een golfminimum. Bepaal de onderlinge afstanden tussen twee interferentiemaxima wanneer de twee bundels samenvallen onder een hoek van 30, 20, 10 en 5 graden en beschrijf wat er gebeurt. Leg uit dat als de afstand tussen de spiegel en de halfdoorlaatbare spiegel toeneemt de hoek waaronder de twee laserbundels elkaar kruisen eveneens toeneemt. Geef aan wat het verband tussen de kruisingshoek en de afstand tussen twee interferentiemaxima is.

Opdracht 12:

In opdracht 10 hebben we gekeken naar een systeem waarbij met behulp van een halfdoorlaatbare en een geheel reflecterende spiegel een interferentiepatroon gecreëerd wordt. Op de VU staat een dergelijke opstelling die samen met het interferentiepatroon is weergegeven in figuur 7. Geef in de foto van de opstelling de volgende componenten aan: laser, halfdoorlaatbare spiegel, spiegel, plek van de kruisende lichtbundels, lens om het interferentiepatroon af te beelden.



Figuur 7. Links: interferentiepatroon door twee kruisende lasers. Rechts: opstelling om interferentiepatroon van twee kruisende laserbundels af te beelden.

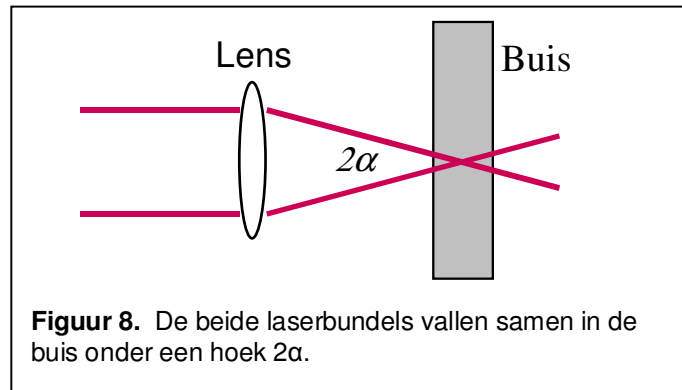


Laser-Doppler anemometrie

Bij deze praktische opdracht ga je Laser Doppler Anemometrie gebruiken om de stroomsnelheid in een model van een bloedvat te meten. Ons model bestaat uit een doorzichtige glazen buis met aan de ene kant een kleine diameter en aan de andere kant een grote diameter. Het gedeelte met een grote diameter beschouwen we als een normaal bloedvat, het gedeelte met een kleinere diameter als een vernauwd bloedvat.

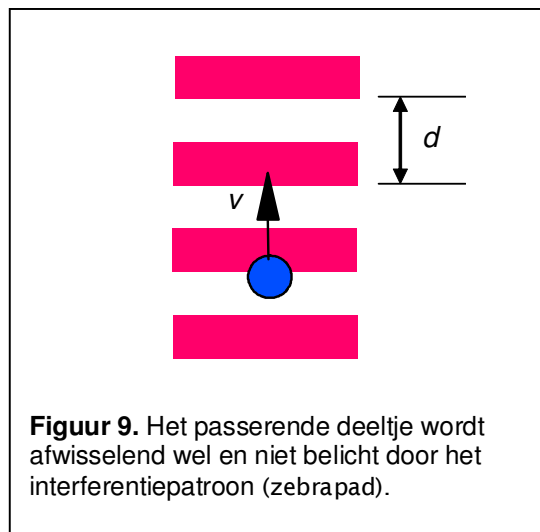
We gaan dadelijk interferentie gebruiken om de snelheid van kleine deeltjes in die buis te meten. Als we de snelheid van die deeltjes weten, dan weten we ook de snelheid van de vloeistof waarin ze bewegen.

Om dit te doen maken we gebruik van twee identieke laserbundels die elkaar kruisen in de buis (figuur 8).



De twee laserbundels veroorzaken een interferentiepatroon zoals je gezien hebt in opdracht 12.

Aan het interferentiepatroon valt niet al te veel te meten. Wanneer echter het interferentiepatroon *verstoord* wordt, zal er iets interessants gebeuren. Ga er even vanuit dat de twee laserbundels elkaar kruisen in een buis gevuld met water waarin zich een groot aantal microscopische deeltjes bevinden die met een bepaalde snelheid bewegen. Op de plaats van het interferentiepatroon “zien” die deeltjes dus een soort van zebrapad (figuur 9).



Op het moment dat het deeltje in het zebrapad “belicht” wordt, zal het het interferentiepatroon verstoren. Echter op het moment dat het deeltje niet belicht wordt kan het ook het interferentiepatroon niet verstoren. Er is dus een periodieke verstoring van het interferentiepatroon door het deeltje.

Opdracht 13:

Neem aan dat het interferentiepatroon alleen wordt verstoord op het moment dat het deeltje zich in het maximum van het interferentiepatroon bevindt met een onderlinge afstand d . Leg uit dat het tijdsverschil tussen twee verstoringen gegeven wordt door:

$$\Delta t = \frac{d}{v}. \quad (18)$$

Aangezien deze verstoringen periodiek plaatsvinden (er zijn immers zeer veel maxima bij het interferentiepatroon) en de tijdsintervallen tussen twee verstoring erg kort zijn, is het verstandiger om niet tijdsintervallen te meten, maar de frequentie van de verstoring (wat eenvoudig te meten valt). Leg uit dat hiervoor geldt:

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v}{d}. \quad (19)$$

Door dus te kijken naar een frequentie kunnen we in principe bepalen wat de snelheid van de deeltjes in het water is. Het enige dat we dan nog moeten weten is de afstand tussen twee maxima. Deze formule valt in principe af te leiden door vergelijking 19 met de dopplerformule te combineren. Dit is echter vrij lastig en dus wordt hier slechts het resultaat van die afleiding gegeven:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \quad (20)$$

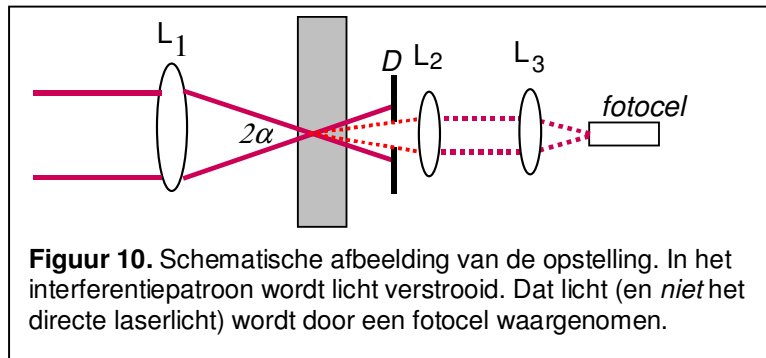
waarbij λ de golflengte van het licht is en de hoek α gedefinieerd is volgens figuur 8. Let op de gelijkenis met de formule voor interferentie uit je natuurkundeboek!

Opdracht 14:

In de opstelling van figuur 7 zijn de twee spiegels op een afstand van 2,0 cm van elkaar geplaatst. De twee laserbundels kruisen elkaar op een afstand van 1,0 m van de spiegels.

- a Bereken hoek α (let op de definitie van α in figuur 8) .*
- b In het experiment wordt een laser met een golflengte van 632,8 nm gebruikt. Bereken de afstand tussen twee interferentiemaxima.*
- c We voegen een buis aan de opstelling toe waarin zich een deeltje bevindt met een snelheid van 0,12 m/s. Bereken de bijbehorende frequentie.*

In de praktische opdracht die je dadelijk gaat uitvoeren ga je stroomsnelheden meten in een dergelijke buis. Om de frequentie daadwerkelijk te meten is het nodig om de laserbundels te blokkeren zodat de afzonderlijke laserbundels niet door de lenzen afgebeeld worden op de fotocel. Alleen de frequenties behorend bij de verstoringen van het interferentiepatroon als gevolg van de weerkaatsingen van het licht mogen afgebeeld worden op de fotocel. Vandaar dat een diafragma aan de opstelling wordt toegevoegd. De volledige opstelling is weergegeven in figuur 10.

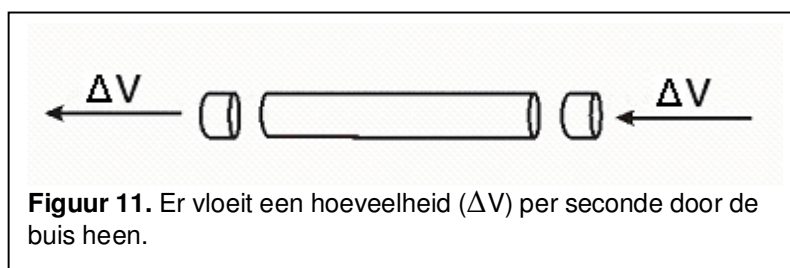


Uit een dergelijk LDA experiment kunnen niet alleen de frequenties van deeltjes worden bepaald, het is ook mogelijk om een idee te krijgen van het *aantal* deeltjes dat het interferentiepatroon passeert. Om dit te bepalen kijken we niet naar de *frequentie* van de piek, maar juist naar het totale oppervlak van de piek: elke keer dat er een deeltje langs komt ontstaat er een klein piekje. Samen vormen die piekjes een grote piek. Als er maar een paar piekjes gemeten worden zal de grote piek klein zijn, en als er heel veel piekjes zijn, wordt de grote piek een stuk groter.

Voordat we daadwerkelijk stroomsnelheden in de buis gaan meten, zullen we eerst nog even kijken naar wat voor stromingsprofiel we verwachten.

Vloeistofdynamica

Er zijn twee manieren om vloeistofdynamica te begrijpen. De eerste manier is om het simpelweg te berekenen. De tweede manier is om het te beredeneren, wat eenvoudiger en leerzamer is. De eerste situatie die we hebben is een vloeistof die door een rechte buis stroomt (figuur 11). Er stroomt per seconde een volume ΔV de buis in.



Opdracht 15:

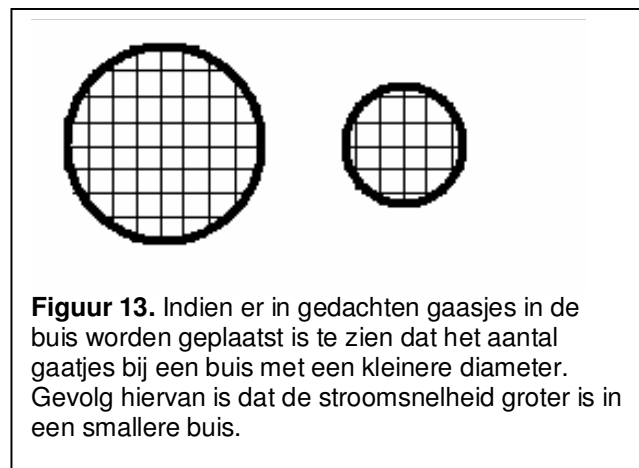
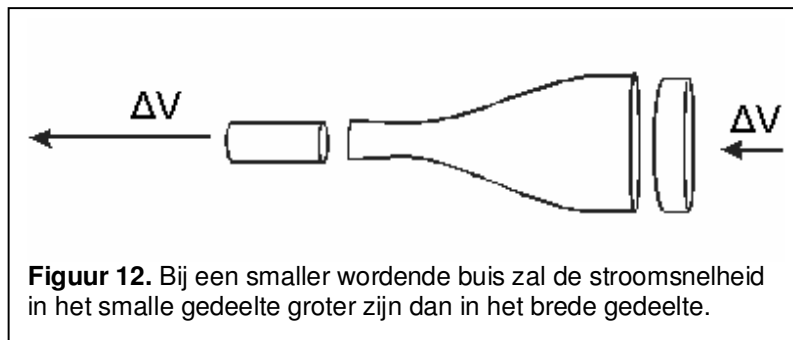
Leg uit dat er ook per seconde een volume ΔV uit de buis moet stromen.

Ook in de rest van de buis zal per seconde een volume ΔV langs stromen. Zou dit niet het geval zijn, dan zou de vloeistof lokaal samengeperst worden en even verderop weer uitgerekt, wat uiteraard niet het geval is. We zien dus dat het totale volume dat per seconde passeert gelijk moet zijn voor de gehele buis.

Wat gebeurt er nu als we een buis nemen die aan de ene kant breed is en aan de andere kant smal (figuur 12). Ook nu zal moeten gelden dat er per seconde evenveel water in de buis stroomt als dat eruit stroomt, maar dat betekent dat er in het smalle deel per seconde net zo veel water langs moet stromen als in het brede deel.

Stel je voor dat we (in gedachte) twee identieke gaasjes in de buis plaatsen: het eerste gaasje plaatsen we in het brede gedeelte van de buis, het tweede gaasje in het smalle deel (figuur 13). Vervolgens kunnen we voor alle gaatjes in de gaasjes bepalen hoeveel water daar per seconde doorheen stroomt. Tot nu toe hebben we steeds gesproken over een *totaal volume* (ΔV) dat *per seconde* door de buis stroomt. Hierbij hoort een eenheid van m^3/s . Als we nu juist gaan bepalen hoeveel water er per seconde door elk gaatje in het gaasje stroomt, zijn we dus eigenlijk aan het kijken naar een volume per seconde door een *oppervlak* gaat. We krijgen dus nu als eenheid $\text{m}^3/(\text{s m}^2) = \text{m/s}$ en hebben hiermee dus eigenlijk een “stroomsnelheid” gedefinieerd (vanaf nu gebruiken we de term “stroomsnelheid” volgens deze definitie).

Je zult nu ook begrijpen dat als eenzelfde hoeveelheid water (ΔV) per seconde zich door het smalle deel van de buis moet persen hier de stroomsnelheid wel groter moet zijn. We zien dus een omgekeerd verband tussen de diameter van de buis en de snelheid van de vloeistofstroom.

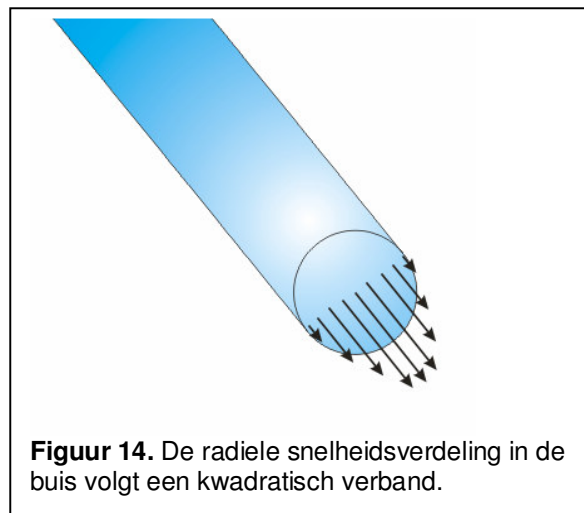


We hebben gezien dat de stroomsnelheid (in m/s) in het smalle gedeelte van de buis groter moet zijn dan in het brede gedeelte van de buis. Het argument daarvoor was dat zowel in het brede als smalle deel van de buis het totale volume dat per seconde door de

buis stroomt gelijk moet zijn. De volgende vraag die nu ontstaat is hoe die stroomsnelheid verdeeld wordt over het dwarsprofiel van de buis, ofwel: hoe is die stroomsnelheid verdeeld over de verschillende gaatjes in de gaasjes?

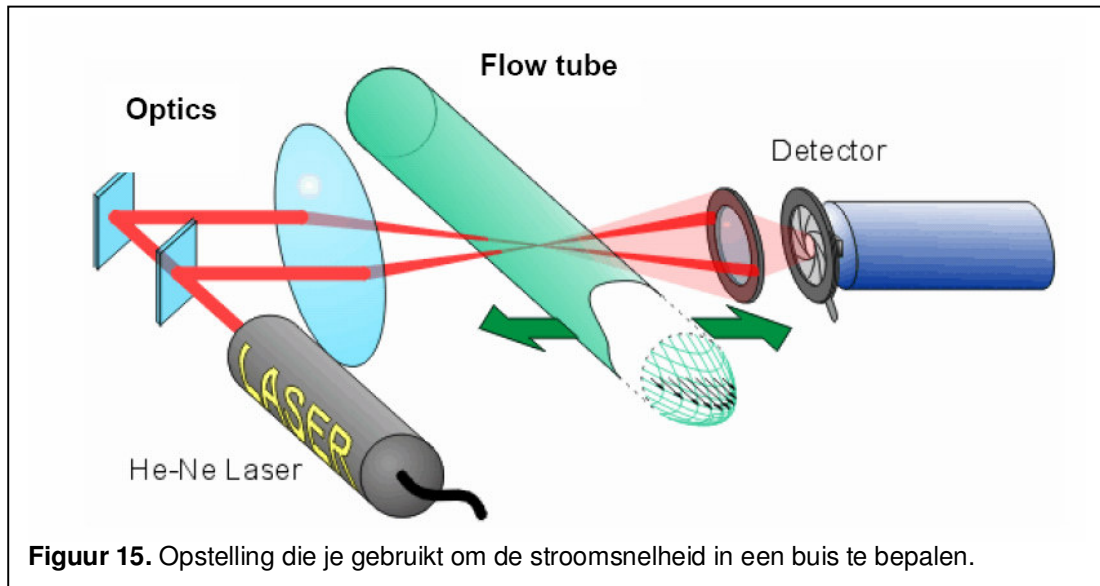
Een eerste (simpele) gedachte zou zijn dat het water overal even snel stroomt. Maar is dat wel zo? Als we nu naar een druppeltje water gaan kijken vlakbij de rand van de buis. Dan heeft dat druppeltje water een bepaalde snelheid. Echter het glas van de buis ernaast staat stil. Er is contact tussen dat druppeltje water en de buis, dus ontstaat er wrijving.

Hierdoor zal het druppeltje afremmen, waardoor het water aan de rand langzaamaan stil zal gaan staan. Kijken we nu naar het druppeltje “naast” het eerste druppeltje dan kunnen we weer een zelfde soort verhaal houden. Ook hier zal wrijving een rol spelen en zal het nieuwe waterdruppeltje wat afgeremd worden. Meer naar het midden van de buis zal dit effect steeds minder worden. Aan de rand zal de snelheid van de vloeistof dus gelijk zijn aan nul en in het midden zal de snelheid maximaal zijn. Van het rand naar het midden toe zal de stroomsnelheid *geleidelijk* toenemen. Zonder een afleiding te geven stellen we hier dat het verband tussen de afstand tot het middelpunt van de buis en de stroomsnelheid *kwadratisch* is: we zullen dus een parabool zien zoals weergegeven in figuur 14.



Het experiment: besturing via het web

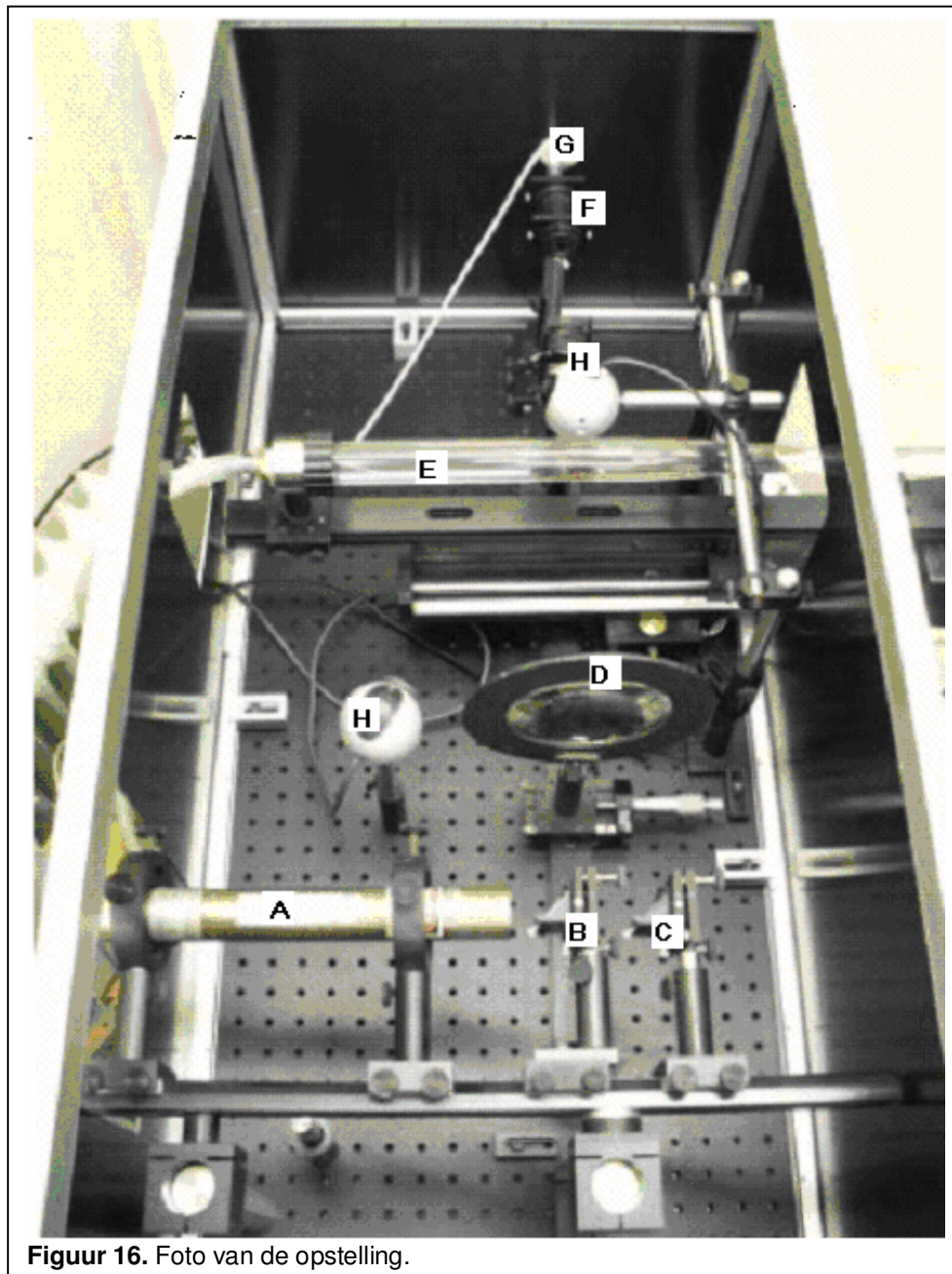
Je gaat de gevolgen van bloedvatvernauwing onderzoeken in een systeem dat hierop lijkt. We hebben twee identieke laserbundels die elkaar kruisen in een buis met water. De buis heeft een vorm zoals in figuur 12. In het water bevinden zich kleinere deeltjes die het interferentiepatroon verstoren. Dit kunnen we waarnemen met onze opstelling, die er uit ziet als in figuur 10. Hiermee is de opstelling eigenlijk een soort van bloedvat: er is een breed gedeelte en een smal gedeelte (waar het bloedvat vernauwd is) en je zult de stroomsnelheid in beide gevallen meten. Vervolgens ga je een methode die veel gebruikt wordt om bloedvernauwing tegen te gaan ook toepassen op dit systeem.



Je zal het experiment via internet uitvoeren. Dat wil zeggen dat de gehele besturing vanaf de computer thuis of op school plaats zal vinden. Omdat je dus niet zelf de opstelling kan zien, is er een foto van de opstelling toegevoegd (figuur 16).

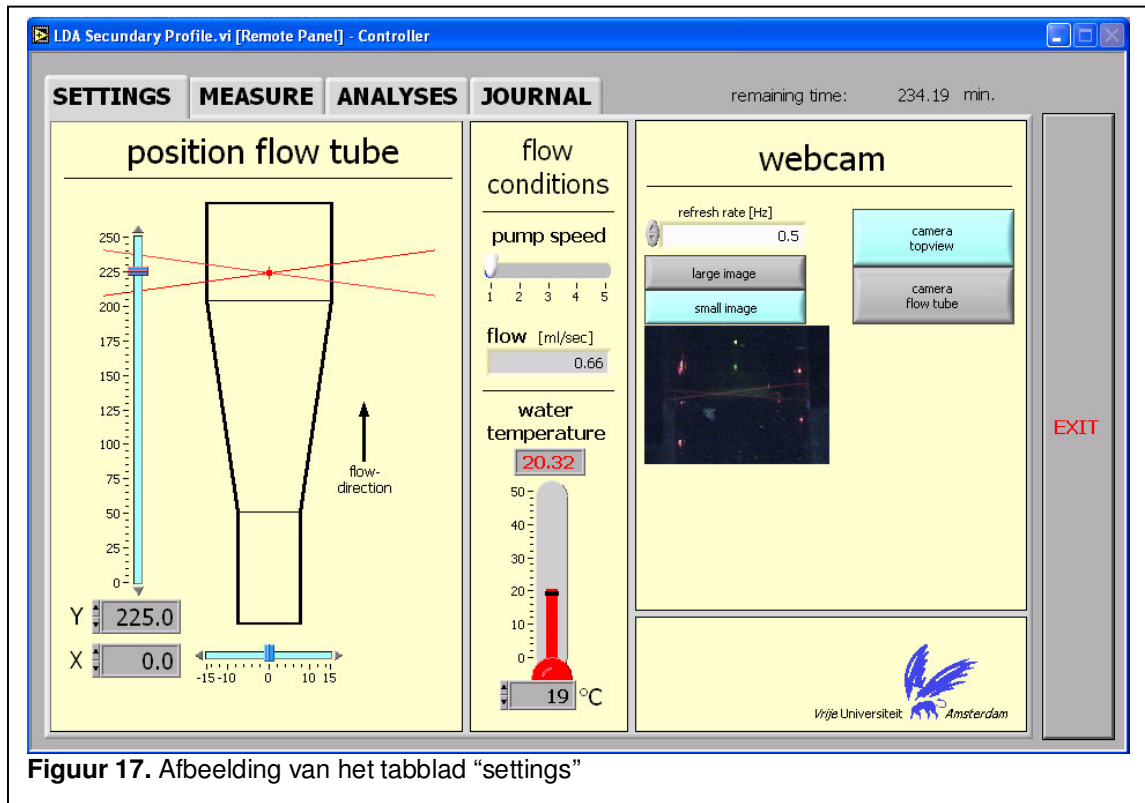
Een helium-neon laser (A) wordt op een tweetal spiegels (B en C) geschenen. Spiegel B is half-doorlaatbaar en spiegel C reflecteert al het licht. Er zijn nu twee laserbundels ontstaan die door middel van lens (D) gekruist worden. Het kruispunt van beide bundels ligt in buis (E). Het diafragma (F) zorgt ervoor dat het oorspronkelijke laserlicht niet in de fotocel (G) schijnt, maar het als gevolg van de deeltjes in de buis verstrooide licht wel. Twee webcams (H) worden gebruikt zodat jullie kunnen “zien” wat er in de opstelling gebeurt. Het enige dat in de opstelling kan bewegen is de buis.

Het besturen van de opstelling gaat via internet via de website van de digitale universiteit. Dit wordt in het hoofdstuk “het experiment: het daadwerkelijk uitvoeren” beschreven. De aansturing van de opstelling wordt hier wel besproken



Figuur 16. Foto van de opstelling.

Het programma heeft vier tabbladen. In het tabblad “settings” kun je de opstelling naar wens instellen (figuur 17). Links zie je het kopje “position flow tube”. Door de schuifjes te verslepen (of gewoon een getalletje in te typen) en daarna op het knopje “change position” te drukken (dat verschijnt nadat je de positie gewijzigd hebt), kun je de positie van het focus ten opzichte van de buis variëren. Let daarbij op dat de opstelling niet altijd helemaal netjes gekalibreerd is. Het kan dus zo zijn dat als je $X = 0$ instelt de bundel niet helemaal precies in het midden van de buis zit. Je kunt het midden van de buis bepalen uit het stroomprofiel.



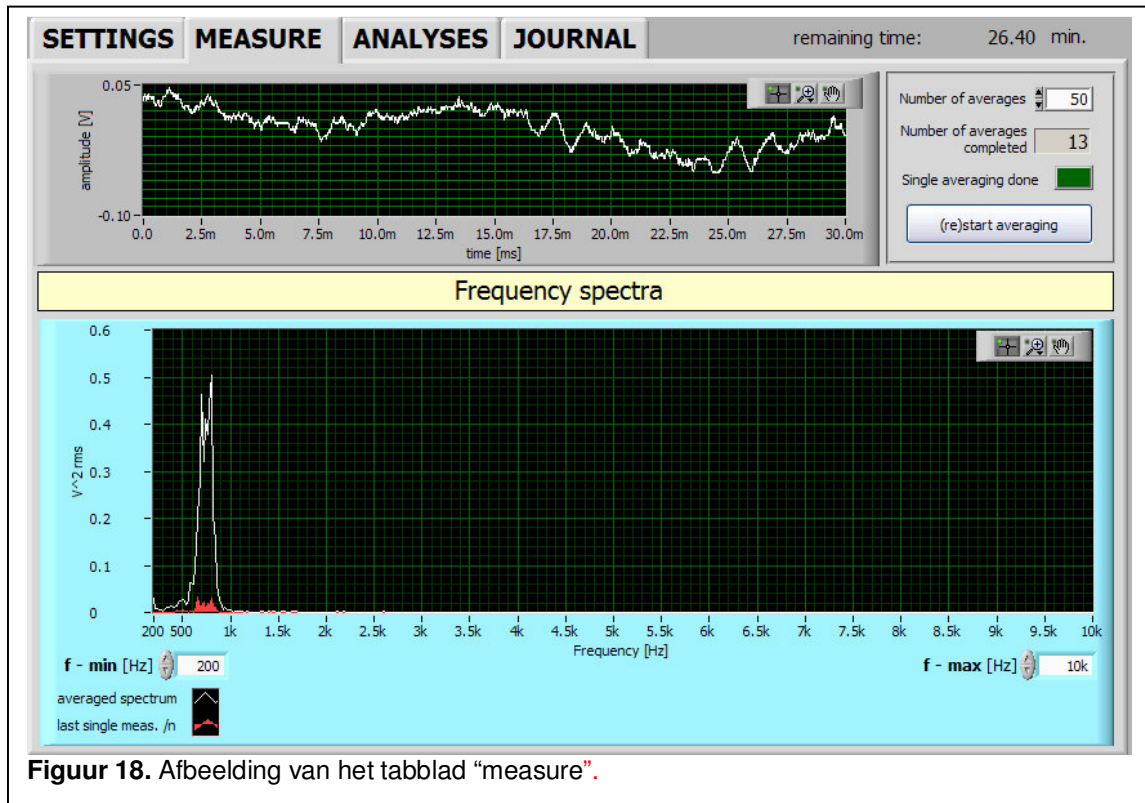
Figuur 17. Afbeelding van het tabblad “settings”

In het middelste gedeelte kun je de snelheid van de pomp die het water rondpompt variëren (pump speed). Een flow-metertje geeft weer hoeveel water er per seconde door de buis stroomt (in ml/s), dus datgene wat we eerder $\Delta V/s$ hebben genoemd. Voor de experimenten die je gaat uitvoeren is het niet nodig om dit aan te passen: stel deze daarom in op stand 3 (ongeveer 0.6 ml/s).

Onder kun je de temperatuur van het water aanpassen. Dit doe je wederom door of het schuifje te verslepen of door een getalletje in te typen.

Het rechter gedeelte van dit tabblad laat beelden van de webcam zien. Je kunt kiezen voor een blik van boven en een blik van opzij, ook kun je afhankelijk van de snelheid van je internetverbinding het aantal beeldjes dat je per seconde van de camera ontvangt aanpassen (refresh rate). Meestal is 1 Hz ruim voldoende om te zien wat er gebeurt: als je internetverbinding traag is kan je hem ook lager zetten.

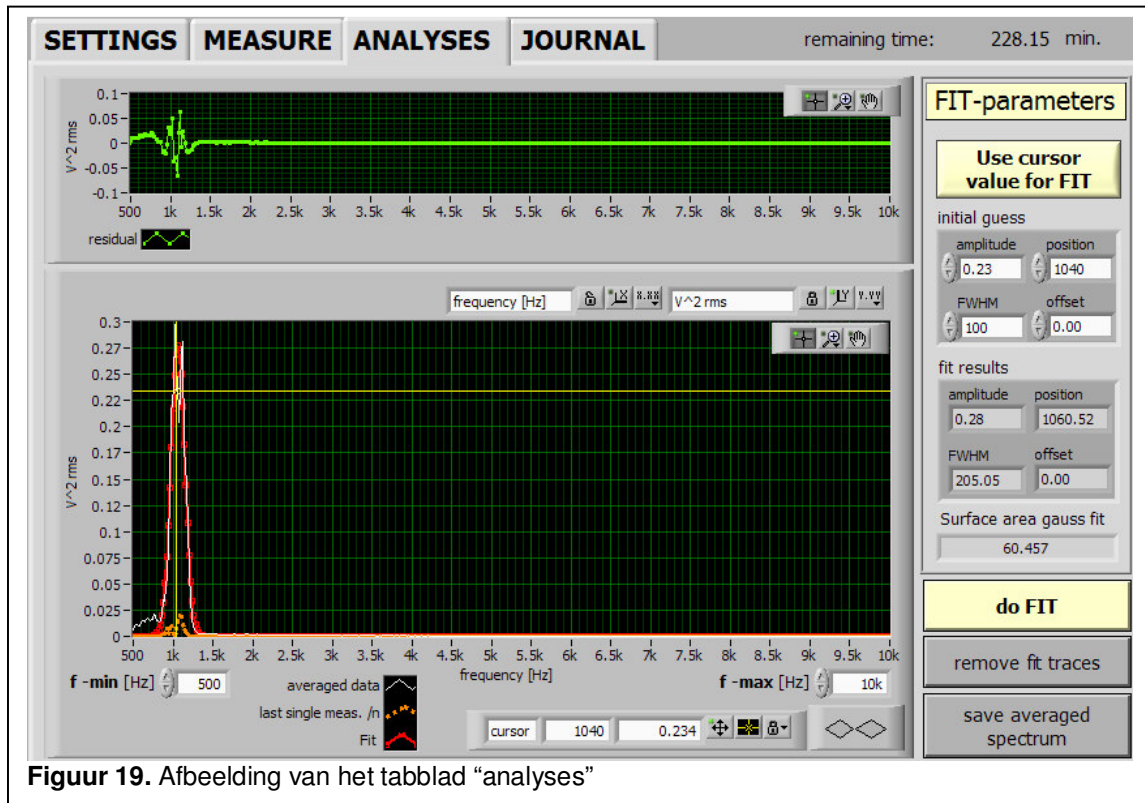
Nadat de juiste waarden ingesteld zijn, kun je bovenaan klikken op “measure”. Het meet-tabblad verschijnt nu.



Figuur 18. Afbeelding van het tabblad “measure”.

In het tabblad “measure” doe je de daadwerkelijke metingen (figuur 18). Linksboven zie je het signaal dat de fotocel waarneemt. Daaronder (bij frequency spectra) zie je het frequentiespectrum van het signaal van de fotocel. Dat frequentiesignaal is gerelateerd aan de snelheid van deeltjes in het water (vergelijking 19). Om een beter signaal te krijgen wordt het frequentiespectrum gesommeerd over (standaard) 50 metingen. In het rood zie je de laatste meting weergegeven en in het wit de som van alle spectra. Onderaan zie je f-min en f-max staan, waarmee je de frequentie schaal kunt aanpassen (eigenlijk de x-as op onderstaande grafiek). Normaliter kun je die van 500 Hz tot 10 kHz laten lopen.

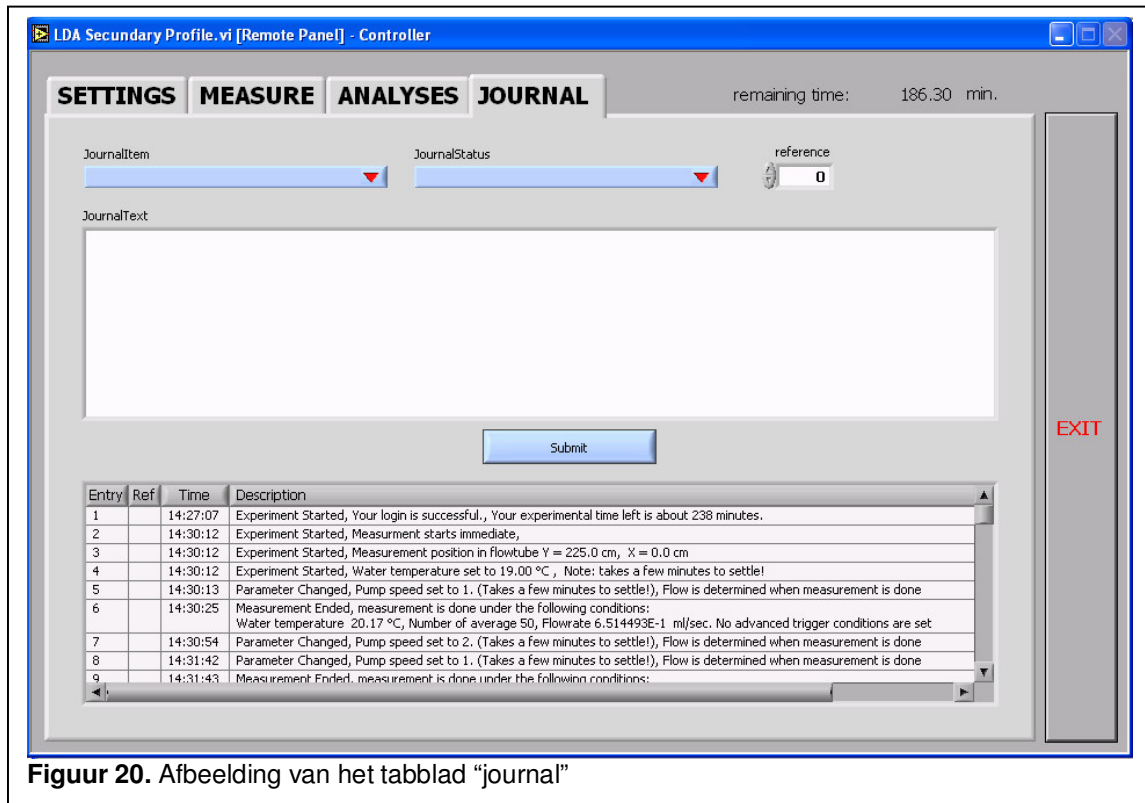
Rechtsboven zie je de knop (re)start averaging. Hiermee start je een meting. Er wordt dus gemiddeld over 50 metingen. Het aantal kan je bij “number of averages” instellen. Hoeveel er al van die metingen gedaan zijn kun je zien bij “number of averages completed”. Zodra “single averaging done” helder groen oplicht kun je verder naar het tabblad “analyses” waar je de analyse kan gaan doen.



Figuur 19. Afbeelding van het tabblad “analyses”

Bij de analyse kun je de eigenschappen van de frequentiepiek bepalen die in de grootste grafiek is weergegeven (figuur 19). De piek is een klokkromme en kan dus als zodanig gefit worden. Het fitten doe je door de cursor (het gele “kruis” in de grafiek) naar de top van de piek te verslepen, waarmee je een schatting maakt van de hoogte en de positie van de piek. Vervolgens klik je op “use cursor value for FIT”. Hiermee wordt je schatting ingevoerd bij het onderdeel van het programma dat de piek gaat fitten. Vervolgens kun je op “do FIT” klikken. Bij fit results zie je nu de resultaten van de fit. Je zult voor je verwerking alleen de position en de peak surface gebruiken. De fit wordt ook in de grafiek erbij getekend (rode lijn) en boven die grafiek zie je het verschil tussen de fit en het spectrum (groene lijn). Je kunt de fit weer weg halen door op “remove fit traces” te klikken en met “save averaged spectrum” kun je het spectrum opslaan.

In het tabblad “journal” wordt alles wat je doet bijgehouden (figuur 20). Het is eigenlijk een soort logboek. Je kunt eventueel ook zelf nog dingen aan het journal toevoegen. Dat doe je door bij journal text een tekst in te typen en dan op “submit” te drukken. Na afloop van je experimenten kun je het logboek downloaden.



Figuur 20. Afbeelding van het tabblad "journal"

Het experiment: het daadwerkelijk uitvoeren

Je weet nu hoe de software ongeveer werkt. Start nu het web-experiment op via: <http://www.science.uva.nl/remotelabs/website/>. Als het goed is heeft je docent een reservering gemaakt voor het webexperiment. Log in en ga naar my reservations. Hier kun je nu als het goed is klikken op start experiment. Om het experiment te kunnen draaien heb je LabView RunTime Engine v7.1 nodig. Het downloaden hiervan gebeurt zodra je het programma voor de eerste keer opstart (grootte ± 33 MB, het downloaden kan dus even duren).

Kies het secondary education profile dat speciaal voor middelbare scholieren ontwikkeld is. Nadat je ongeveer 2 minuten moet wachten verschijnt het programma dat we zojuist besproken hebben.

We bekijken de gevolgen van bloedvatvernauwing. Onze opstelling is een simulatie van dat probleem. Allereerst bekijken we een normaal bloedvat, wat we vergelijken met het brede deel van de buis.

Stel de temperatuur in op 18 graden. Let op: het kan even duren voordat de juiste temperatuur bereikt is.

Maak van de tussentijd gebruik om met behulp van het plaatje van de opstelling op het tabblad “settings” de hoek tussen de twee laserbundels te meten.

Onze meting gebeurt op de manier zoals beschreven op pagina 14. Je meet dus niet *direct* de stroomsnelheid (in m/s), maar je meet een *frequentie* die je aan de stroomsnelheid kunt relateren. Met behulp van de vergelijkingen 19 en 20 kun je de gemeten frequentie vervolgens naar een stroomsnelheid omrekenen.

Je gaat eerst een aantal stroomsnelheden in het brede gedeelte van de buis meten. Kies dus een vaste waarde voor y (het ingestelde getal van 225 cm is meestal goed) en varieer de waarde voor y in het “settings” tabblad. Gebruik vervolgens het “measure” en het “analysis” tabblad om de frequentie en het totale oppervlak van de pieken te bepalen. Sla de spectra op en vul onderstaande tabel in.

[illegible]

Het smalle gedeelte van de buis kunnen we vergelijken met een vernauwd bloedvat. Meet nu wederom de stroomsnelheid op verschillende posities in het smalle gedeelte van de buis (meestal is een y -waarde van 25 goed).

	Flowspeed:
	Y-positie
	Temperatuur:
<u>Smalle gedeelte buis</u>	
X-positie	Frequentie piek

Er is een aantal mogelijkheden om bloedvatvernauwing tegen te gaan. Bekende voorbeelden zijn het dotteren en (als het in een bloedvat nabij het hart gebeurt) het maken van een bypass. Op dit moment zullen we nog niet op deze (operatieve) ingrepen ingaan, maar naar een minder ingrijpende oplossing gaan kijken.

Een veel gebruikte oplossing om klachten als gevolg van bloedvatvernauwing (zoals de eerder genoemde etalagebenen) tegen te gaan is het toevoegen van bloedverdunners aan het bloed. Bloedverdunners hebben invloed op de viscositeit (stroperigheid) van het bloed. Des te stroperiger het bloed, des te langzamer het stroomt. Om dit te illustreren kun je goed aan een fles gevuld met stroop denken. Het moge duidelijk zijn dat deze veel minder langzaam leegstroomt dan een flesje water.

Van water is bekend dat de stroperigheid varieert met de temperatuur: bij een hogere temperatuur is de stroperigheid veel kleiner. Dat geldt ook voor stroop: als je een fles met stroop verwarmt vloeit de stroop veel gemakkelijker uit de fles. Het is daarentegen vrijwel onmogelijk om stroop te gieten uit een fles die je in de koelkast bewaard hebt. We kunnen dus onderzoeken wat er gebeurt met de stroomsnelheid in de buis als het water verwarmen.

Zonder de formule verder af te leiden stellen we dat de stroomsnelheid van een vloeistof af hangt van de stroperigheid volgens:

$$v \propto \frac{1}{\eta}, \quad (21)$$

hierbij is η de viscositeit in Pa s.

Temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)	Viscositeit (10^3 Pa s)
10	1,307
20	1,002
30	0,7975
40	0,6529
50	0,5468

(bron: Handbook of physics and chemistry)

Je gaat nu de opstelling in verschillende stapjes verwarmen en daarbij het totale volume ($\Delta V/s$) die per seconde door de buis stroomt bepalen (in de opstelling de “flow speed” genoemd). Let op dat het even duurt voordat de opstelling de ingestelde temperatuur heeft bereikt. Wacht zelfs als de opstelling op temperatuur is nog een paar minuten voordat je begint met meten. Vul hiervoor onderstaande tabel in (let op: het effect is niet heel groot, maar wel meetbaar).

Temperatuur	Flow speed

Als je deze metingen hebt uitgevoerd, ben je in principe klaar. Je log file wordt automatisch opgeslagen en kan je na afloop (net als je opgeslagen spectra) terug vinden bij “your experiment sessions” op de homepage van de digitale universiteit.

Verwerking van het experiment

Je hebt een aantal metingen verricht op de laser-doppler anemometrie opstelling. Allereerst zul je die metingen gaan verwerken. Dat kun je in het programma Excel doen. Maak van elk van je data een grafiek: maak eerst een grafiek waarbij je de gemeten frequentie waarde uitzet tegen de positie in de buis. Gebruik vervolgens vergelijking 19 om de stroomsnelheid uit te zetten tegen de positie in de buis. Vervolgens kun je de best mogelijke parabool door je datapunten trekken. Normaal zou je dat wellicht op het oog proberen, maar excel kan dat nauwkeuriger (en eenvoudiger) voor je doen. Dat gaat als volgt:

Selecteer de grafiek.

Ga naar “grafiek” in de menu werkbalk en klik op trendlijn toevoegen.

Klik op “polynoom” en kies graad “2”.

Geef in het tabblad opties aan dat je de vergelijking in de grafiek wil toevoegen.

Klik op OK.

Als het goed is verschijnt er nu een parabool in je grafiek met de bijbehorende formule.

Vervolgens kun je met behulp van die formule de volgende eigenschappen controleren:

- 1 de dikte van de buis in eenheden zoals die in het tabblad “settings” gebruikt worden (bereken de nulpunten van de parabool en trek deze van elkaar af)
- 2 de “top” van de parabool (verandert deze plek voor de verschillende metingen? Zo ja, hoe komt dat?)

Herhaal dit voor je verschillende metingen en vergelijk deze? Wat gebeurt er in het smallere gedeelte van de buis? Wat gebeurt er als de temperatuur verhoogd wordt? Wat kan je vervolgens concluderen over bloedvatvernauwing en mogelijke remedies?

Maak ook een grafiek waarbij je de oppervlakte van de piek uitzet tegen de x-positie. Zie je hierbij hetzelfde gedrag?

Verslaglegging van het experiment

Schrijf een verslag van je experiment. Houd je daarbij aan het verslagmodel van je docent.

Maak in je verslag een duidelijke koppeling tussen het experiment en het probleem van bloedvatvernauwing. Geef aan of de gesuggereerde methode (bloedverdunners toevoegen) werkt. Geef ook aan wat de nadelen van bloedverdunners toevoegen zijn en bespreek andere behandelmethodes voor het oplossen van bloedvatvernauwing rond het hart (dotteren en het uitvoeren van een bypass-operatie). Hiervoor zul je waarschijnlijk nog wat literatuuronderzoek moeten verrichten.